

REFORESTATION ET STOCKAGE DU CARBONE AU XX^{ème} SIÈCLE SUR LE VERSANT SUD DU MONT-LOZÈRE (FRANCE)

Claude MARTIN ⁽¹⁾, Jean-François DIDON-LESCOT ⁽¹⁾,
Sylvain LHUILLIER ⁽²⁾ et Pierre USSELMANN ⁽¹⁾

(1) : UMR 6012 "ESPACE" du CNRS, Université de Nice, Département de Géographie, 98 Boulevard Édouard Herriot, BP 3209, F 06204 Nice Cedex 3, France. Mél : martincl@infonie.fr

(1) : Parc national des Cévennes, 6 bis Place du Palais, F 48400 Florac, France. Mél : sylvainlhuillier@hotmail.com

Résumé :

L'étude s'appuie sur les travaux réalisés sur le Bassin Versant de Recherche et Expérimental (BVRE) du Mont-Lozère. Les parcelles étudiées sont situées en terrain granitique, sous un climat de type méditerranéen montagnard, à des altitudes comprises entre 1100 et 1500 m.

La dénudation des versants a atteint son maximum au milieu du XIX^{ème} siècle, époque où l'élevage ovin avec transhumance était particulièrement actif. La déprise rurale amorcée à la fin du XIX^{ème} siècle, a permis l'extension du hêtre (*Fagus silvatica*) à partir de peuplements résiduels. Des pins à crochets (*Pinus montana*) ont été plantés, au-dessus de 1450 m d'altitude, entre 1890 et 1910 (RTM). La sylviculture résineuse s'est développée avec des plantations d'épicéas (*Picea abies*) de 1925 à 1935, puis avec celles de divers résineux en association vers 1970.

La pessière étudiée sur le bassin de la Latte (épicéas plantés autour de 1930, associés à des pins à crochet) présente une biomasse de 120 t/ha de matière séchée à 85 °C (pour 395 arbres/ha). Cette valeur faible est liée aux mauvaises conditions du milieu pour les épicéas. Le stock de carbone est de 61 t/ha. La biomasse de la hêtraie de la Sapine (laquelle est issue d'une recolonisation spontanée) atteint, sans les feuilles, 325 t/ha (pour 4270 arbres). Le stock de carbone correspondant est de 155 t/ha.

Le stock de carbone organique des sols est évalué à 249 t/ha sur le site de la Latte (en intégrant la totalité de la litière, soit 35 t/ha de carbone) et à 192 t/ha sur celui de la Sapine (avec l'apport de litière de l'année, qui représente 2,8 t/ha de carbone). Les différences sont faibles avec une pelouse d'altitude pâturée (bassin des Cloutasses).

Au cours des dernières années, l'incrément de la biomasse pérenne de la hêtraie dense de la Sapine s'est élevé à 19 t/ha/an et celle du carbone fixé dans cette biomasse à 9,2 t/ha/an. Pour la pessière de la Latte on obtient respectivement des valeurs de 2,8 et 1,4 t/ha/an. La fermeture du couvert végétal se poursuit actuellement. En 1999, sur les 32900 hectares du Mont-Lozère et du Bougès nord (sur granites et schistes), 48 % étaient occupés par des forêts denses de feuillus et de résineux, et 37 % par des stades de transition entre les milieux ouverts et la forêt dense.

Mots clés : sols, reforestation, biomasse, épicéas, hêtres, Mont-Lozère.

Abstract :

The study is based on research carried out on the Mont-Lozère Experimental Research Basin (ERB). The plots under study are located on granitic ground at altitudes ranging from 1100 to 1500 meters, in a Mediterranean mountainous climate. Slope denudation reached a maximum during the mid-nineteenth century when sheep husbandry with transhumance was particularly active. Towards the end of the nineteenth century people began to abandon the rural areas, allowing residual stands of beech (*Fagus silvatica*) to develop. From 1890 to 1910, dwarf mountain pines (*Pinus montana*) were planted above 1450 m in altitude (restoration of mountain land). Softwood

culture began to develop from 1925 to 1935 with the planting of spruce trees (*Picea abies*), and around 1970, with the planting of various conifer species in combination.

The biomass of the spruce stand studied on the Latte catchment (spruce planted about 1930 in combination with dwarf mountain pine) is 120 t/ha of dry matter (dried at 85 °C) for 395 trees/ha, this low value being linked to the poor environmental conditions for spruce. The carbon stored amounts to 61 t/ha. The biomass of the beech forest at the Sapine (that originated from a spontaneous recolonization), excluding the leaves, is 325 t/ha for 4270 trees; the corresponding carbon stored is 155 t/ha. The organic carbon stored in the soil is evaluated at 249 t/ha on the Latte site (this includes all litter, or 35 t/ha of carbon) and at 192 t/ha on the Sapine site (including litterfall for the year, or 2.8 t/ha of carbon). The differences are small with a grassland at high altitudes (Cloutasses catchment).

Over the past few years, the perennial biomass increment for the dense beech forest at the Sapine site has been 19 t/ha/year and the increment for the fixed carbon in the biomass, 9.2 t/ha/year. For the spruce forest at the Latte site, the figures are 2.8 t/ha/year and 1.4 t/ha/year, respectively. The plant canopy is gradually closing over. In 1999, 48% of the 32,900 hectares on Mont-Lozère and the North Bougès (on granite and shales) were occupied by dense broadleaf and softwood forests, and 37% by transitional stages between open space and dense forest.

Keywords: soils, reforestation, biomass, spruce, beech, Mont-Lozère.

1 - INTRODUCTION

Le massif du Mont-Lozère (Fig. 1) a connu, au cours du siècle dernier, une intense reforestation, qui se poursuit actuellement. L'objectif de la recherche est d'évaluer les effets de cette reforestation sur le stockage du carbone. Il ne s'agit donc pas d'étudier le cycle de cet élément, mais seulement d'évaluer l'état des stocks et leur évolution.

Le terrain d'étude est localisé dans la partie supérieure du bassin du haut-Tarn, entre le Mont-Lozère au nord et le massif du Bougès au sud. Le substratum est constitué de granites et de schistes métamorphiques. Dans les secteurs où se sont concentrées les observations, sur le versant sud du Mont-Lozère, les altitudes sont comprises entre 1100 et 1500 m. Le climat est de type méditerranéen humide, avec des précipitations annuelles moyennes de l'ordre de 2000 mm et une température moyenne de 6,9 °C à la station de la Vialasse (1300 m d'altitude). Les sols sont acides. Il s'agit de rankers ou de sols bruns présentant souvent une tendance podzolique (D. Trévisan, 1982).

2 - L'HISTOIRE DU COUVERT VÉGÉTAL

Les analyses polliniques réalisées sur des tourbières du Mont-Lozère (J.L. De Beaulieu et É. Gilot, 1972 ; J.L. De Beaulieu et A. Pons, 1979) ont permis de préciser l'histoire du couvert végétal au cours de l'Holocène. À la fin de l'Atlantique (4500 BP), on note une extension des landes aux dépens du pin sylvestre (*Pinus sylvestris*), en raison du léger refroidissement sub-boréal (4500 à 3000 BP) et de l'amorce des premiers défrichements. Vers 2000 BP, le hêtre (*Fagus silvatica*) remplace le pin sylvestre presque partout.

Une première vague de grands défrichements se produit du III^{ème} au X^{ème} siècles après JC. Après une phase de stabilisation de près de 600 ans, les défrichements reprennent sous l'effet d'une très forte pression démographique. La dénudation des versants atteint son maximum au milieu du XIX^{ème} siècle, époque où l'élevage ovin avec transhumance est particulièrement actif (P. Pillet, 1981). La pression pastorale souvent excessive entraîne une érosion intense, sous forme de ravinements.

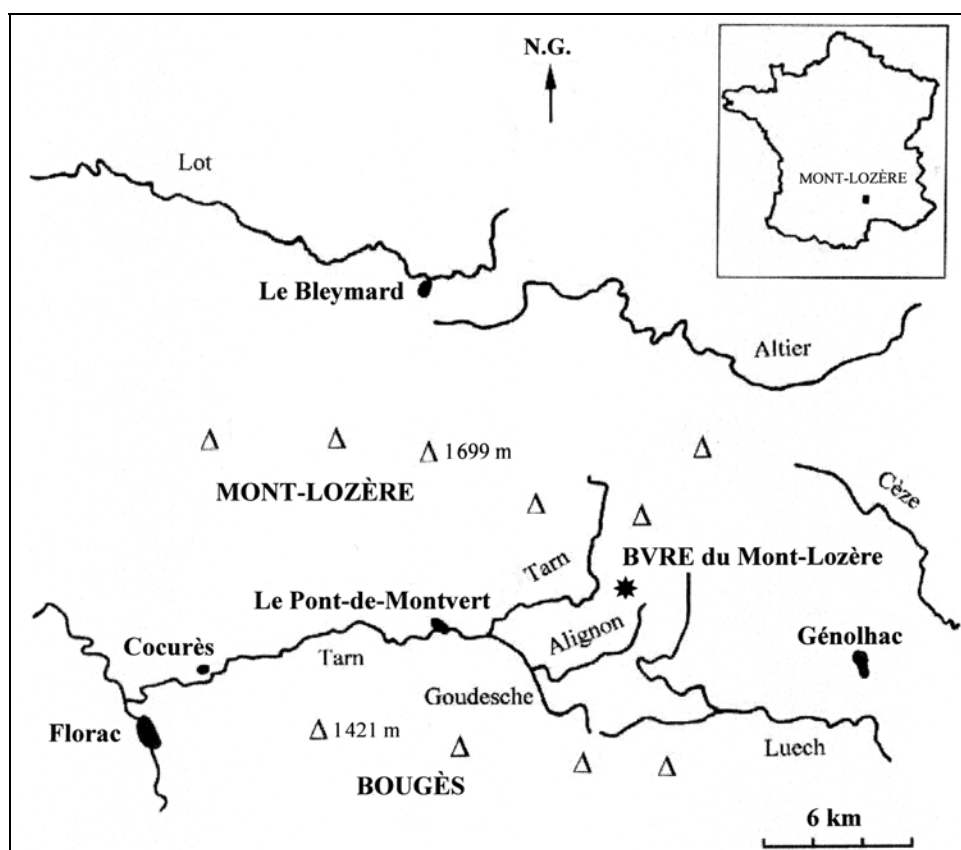


Figure 1 - Localisation du terrain d'étude.

Vers 1850, les forêts (essentiellement des hêtraies) ne couvrent que 20,4 % des 32900 hectares de l'entité constituée par le Mont-Lozère et le versant septentrional du massif du Bougès (P. Pillet, 1981). Ces lambeaux sont généralement très dégradés par l'exploitation qui en est faite dans le cadre des droits d'usage (bois de chauffage, pâturage, charbon de bois).

La prise de conscience de la dégradation des sols de montagne dans le midi de la France conduit à la promulgation de la loi sur la restauration des terrains de montagne (RTM) en 1882. D'intenses travaux de reforestation sont engagés dès la fin du XIX^{ème} siècle. Sur le Mont-Lozère, des plantations de pins à crochets (*Pinus montana*) sont réalisées au-dessus de 1450 m d'altitude entre 1890 et 1910. Dans le même temps, la déprise rurale, amorcée à la fin du XIX^{ème} siècle, permet l'extension spontanée du hêtre à partir des peuplements résiduels.

Enfin, une sylviculture résineuse se développe avec des plantations d'épicéas (*Picea abies*) de 1925 à 1935, puis avec celles de divers résineux en association vers 1970. Dans cette dernière phase, la reforestation bénéficie du soutien du Fonds Forestier National, créé en 1947.

La superficie consacrée à la forêt ne cesse de croître. En 1970, la forêt (taux de recouvrement du sol par les ligneux hauts > 50 %) représente 34,7 % de la superficie de l'unité régionale Mont-Lozère - Bougès Nord (d'après M. Godron, 1974 – in S. Lhuillier, 2000). 8,9 % sont en outre occupés par une lande boisée ou une forêt claire (taux de recouvrement par les ligneux hauts compris entre 25 et 50 %). De 1850 à 1970, la superficie des formations présentant des caractères forestiers est donc passée de 6700 à 14300 hectares. Le couvert végétal relève surtout de l'étage montagnard (hêtre, résineux, landes) ; les étages collinéens (séries du chêne vert et du chêne caducifolié) et sub-alpin (pelouses et ligneux bas) sont faiblement représentés.

La reforestation a provoqué l'arrêt des phénomènes d'érosion sur les versants, ce qui s'est traduit par la cicatrization progressive des ravines. Mais elle a eu une autre conséquence positive : le stockage de carbone dans la biomasse, à une époque où l'utilisation de plus en plus massive des combustibles fossiles commençait d'envoyer d'énormes quantités de CO₂ dans l'atmosphère.

3 - LES OBSERVATIONS SUR LES BIOMASSES

Les données sur les biomasses sont tirées de travaux réalisés dans le cadre des activités du Bassin Versant de Recherche et Expérimental (BVRE) du Mont-Lozère. Elles portent sur une hêtraie (A. Hanchi, 1994) et sur une pessière (J.F. Didon-Lescot, 1996) développées sur des sols granitiques (granite porphyroïde de Pont-de-Montvert).

La hêtraie est située dans le bassin versant de la Sapine (0,54 km² – altitudes comprises entre 1 160 et 1 395 m) et la pessière dans celui de la Latte (0,195 km² – altitudes comprises entre 1 340 et 1 493 m).

La hêtraie du bassin de la Sapine s'est progressivement constituée à la suite de l'abandon des activités humaines au début du XX^{ème} siècle, par colonisation spontanée des versants à partir de quelques arbres localisés en fond de vallon. Les comptages réalisés en 1990, dans la partie la plus fortement boisée du bassin versant, indiquent une densité de 4270 tiges/ha. Les arbres avaient des âges compris entre 20 et 107 ans. Dans ses parties les plus anciennes, le taillis n'avait subi aucun entretien depuis 70 ans. Il était totalement dépourvu de sous-bois.

La parcelle étudiée sur le bassin de la Latte (Parcelle 49) a subi des plantations de pins à crochet et d'écéas autour de 1930. Suite à une attaque par un scolyte (*Dendroctonus micans*) qui a provoqué le dépérissement des écéas à partir de 1983, cette parcelle a subi une coupe à blanc de 1987 à 1989. En 1985, elle offrait une densité de peuplement de 354 arbres/ha (334 écéas et 20 pins à crochets). Au moment de la coupe, les arbres avaient un âge de 60 ans environ, proche de l'âge moyen des hêtres du bassin de la Sapine en 1990. Aucun sous-bois n'était associé à cette formation.

3.1 - Les méthodes de mesure

L'évaluation des biomasses a été menée selon la méthode de G.I. Baskerville (1965), qui exploite les relations liant les différents éléments de la biomasse des arbres (aiguilles ou feuilles, branches, tronc, écorce et racines) au diamètre des troncs à une hauteur de 1,30 m (\varnothing_{130}).

Pour les parties aériennes, les régressions utilisées entre les masses de matière séchée à 85 °C et le diamètre du tronc ont été établies à partir des observations effectuées sur 10 hêtres (en 1990), sur 8 écéas choisis parmi les moins malades et sur 2 pins à crochet (en 1989).

Les hêtres ont été abattus en hiver, donc sans feuilles. La masse foliaire a été suivie en effectuant chaque mois, pendant deux ans, des prélèvements sur des branches de tailles différentes.

Pour les écéas, des mesures effectuées sur quatre arbres ont permis de déterminer une équation pour calculer la masse des souches (troncs coupés à 30 cm de hauteur) et des grosses racines (d'un diamètre supérieur à 1 cm). Les informations tirées de la littérature (S. Le Goaster *et al.*, 1991 ; J. Ranger *et al.*, 1992...) ont conduit à attribuer aux racines fines une masse égale à 2,8 % de celle des parties aériennes pérennes (troncs, branches et écorces).

Pour la hêtraie, il a été considéré que les racines représentaient 15 % de la biomasse aérienne pérenne sèche (B. Ulrich *et al.*, 1974).

Le calcul des biomasses a été mené à partir du dénombrement des peuplements forestiers sur chacun des sites. Dans le cas de la hêtraie de la Sapine, l'inventaire a porté (en 1990) sur cinq transects perpendiculaires à la direction du cours d'eau principal (total des surfaces traitées : 0,76 ha). Dans le cas de la pessière de la Latte, les observations ont été réalisées (en 1985) sur dix neuf placettes de 400 m² chacune (total : 0,76 ha) réparties sur l'ensemble de la parcelle 49.

3.2 - Les résultats

Les valeurs tirées des travaux de A. Hanchi (1994) et de J.F. Didon-Lescot (1996) sont portées dans le tableau I.

Tableau I - Biomasses (t/ha) de la hêtraie de la Sapine et de la pessière (Parcelle 49) de la Latte.

	Hêtraie de la Sapine en 1990 (âge moyen : 60 ans)	Pessière de la Latte en 1989 (âge de la plantation : 60 ans)
Feuilles ou aiguilles	6,9 □	6,7 [20,1 *]
Branches	61,9	25,0
Troncs et écorces	220,0	68,6
Racines	43,0	19,3
Total	331,8	119,6 [133,0 *]
Incrément annuel moyen	5,5	2,0 [2,2 *]

□ : masse foliaire maximale dans l'année.* : estimation pour une pessière saine.

La biomasse de la hêtraie dense de la Sapine est très forte en comparaison des données rapportées par la littérature (P. Duvigneaud *et al.*, 1971 ; B. Ulrich *et al.*, 1974 ; L. Hallbäcken, 1992 ; etc.). Celle de la pessière de la Latte se révèle, en revanche, particulièrement faible (B. Nihlgard, 1972 ; C. Nys *et al.*, 1983 ; S. Le Goaster *et al.*, 1991 ; etc.).

Les altitudes moyennes, de 1270 m à la Sapine contre 1420 m à la Latte, interviennent évidemment sur la croissance des arbres. De plus, si la hêtraie de la Sapine n'a depuis longtemps fait l'objet d'aucun travail sylvicole, ce qui explique sa densité, la pessière de la Latte a subi deux éclaircies, la première en 1946 et la seconde en 1974. Les arbres coupés lors de ces éclaircies représentaient respectivement des biomasses totales de 13,6 et 30,6 t/ha (J.F. Didon-Lescot, 1996). Notons enfin que le dépérissement de la pessière de la Latte à partir de 1984 a freiné l'augmentation de la biomasse et provoqué une nette diminution de la masse foliaire. Saine, la pessière aurait présenté une masse d'aiguilles environ trois fois plus élevée (B. Nihlgard, 1972 ; etc.).

À titre de comparaison, notons que, dans le même secteur, sur le bassin versant des Bouzèdes, une biomasse de 32 t/ha a été trouvée pour une lande à genêt (J.M. Dauge, 1986).

4 - LES STOCKS DE CARBONE DANS LA BIOMASSE

Pour déterminer les stocks de carbone organique à partir des biomasse, il faut connaître les teneurs en cet élément exprimées par rapport au matériel végétal séché à 85 °C. Les données qui étaient disponibles (O. Maman, 1997) portent malheureusement sur du matériel séché à l'air. Elles offrent cependant l'intérêt de montrer que, pour un même arbre, les teneurs en carbone varient peu entre les différentes composantes de la biomasse. Pour compléter les informations disponibles, nous avons fait analyser par le Service Central d'Analyse du CNRS (dosage du CO₂ produit par la combustion de l'échantillon à 1050 °C sous courant d'oxygène), un tronc de hêtre, une branche d'épicéa vivante et une branche d'épicéa récupérée dans un andain vieux de 12 ans (Tab. II).

Tableau II - Teneurs en carbone (% du matériel séché à 85 °C) d'un tronc de hêtre et de deux branches d'épicéas du Mont-Lozère.

Tronc de hêtre	Branche d'épicéa vivante	Branche d'épicéa en andain
47,67	51,17	51,24
47,86	51,32	51,29

4.1 - Les stocks de carbone liés à la biomasse "pérenne"

La biomasse pérenne est constituée des troncs, des branches et des racines. Pour la pessière (épicéas et pins à crochet), nous y avons ajouté les aiguilles, les feuillages ayant un caractère persistant. Pour la hêtraie, au contraire, le carbone des feuilles n'a pas été comptabilisé.

En appliquant les teneurs trouvées pour le tronc de hêtre (47,77 %) et pour la branche d'épicéa vivante (51,25 %), on obtient les valeurs suivantes des stocks de carbone (Tab. III) :

Tableau III - Stocks de carbone (t/ha) dans la biomasse "pérenne" de la hêtraie de la Sapine et de la pessière de la Latte.

	Hêtraie de la Sapine en 1990	Pessière de la Latte en 1989
Aiguilles	-	3,4 [10,2 *]
Branches	29,6	12,8
Troncs et écorces	105,1	35,2
Racines	20,5	9,9
Total	155,2	61,3 [68,1 *]
Incrément annuel moyen	2,6	1,0 [1,1 *]

* : estimation pour une pessière saine.

4.2 - Les vitesses de stockage sur des périodes récentes

Les hêtres de la Sapine ont été répartis en 10 classes centrées sur des diamètres à 1,30 m de hauteur allant de 2,5 à 47,5 cm (A. Hanchi, 1994). Pour chaque classe, nous connaissons le nombre d'arbres à l'hectare, l'âge correspondant au diamètre central et une estimation de la biomasse du bois (troncs + branches). Il est donc possible d'évaluer l'augmentation totale de la biomasse au cours des dernières années, après avoir déterminé pour chaque couple de classes successives la vitesse moyenne de croissance des arbres, par exemple avec les classes centrées sur des diamètres de 22,5 et 17,5 cm :

$$VAB\ 22,5 = ((Bm\ 22,5 - Bm\ 17,5) / (Am\ 22,5 - Am\ 17,5)) \times nb\ arbres$$

où "VAB 22,5" est la vitesse d'augmentation (t/ha/an) sur la période récente de la biomasse totale du bois de la classe centrée sur un diamètre des troncs de 22,5 cm ; "Bm 22,5" et "Bm 17,5" les biomasses moyennes (t/ha) des arbres appartenant aux classes centrées sur les diamètres 22,5 et 17,5 cm (Bm = biomasse totale / nombre d'arbres) ; "Am 22,5" et "Am 17,5" les âges moyens (en années) des arbres des classes 22,5 et 17,5 cm ; "nb arbres" le nombre par hectare d'arbres de la classe 22,5 cm. L'âge des arbres est donné par la relation avec le diamètre du tronc à 1,30 m de hauteur, établie à partir de la mesure du diamètre et du comptage des cernes sur 17 individus. La différence d'âge entre deux classes successives est de 8,7 ans.

L'incrément de la biomasse de la hêtraie est de 16,78 t/ha/an pour le bois (troncs et branches) et de 2,56 t/ha/an pour les racines.

En ce qui concerne la pessière de la Latte, l'accroissement du diamètre moyen des arbres entre les mesures effectuées lors de l'éclaircie de 1974 (\varnothing_{130} : 20 cm) et de la coupe de 1989 (\varnothing_{130} : 27 cm) a servi à calculer l'incrément annuel moyen de la biomasse des troncs et des branches. Celui-ci est évalué à 2,38 t/ha. Pour les aiguilles et les racines, nous avons appliqué les rapports trouvés en 1989 entre les masses de ces éléments et la masse aérienne de bois (J.F. Didon-Lescot, 1996). L'incrément annuel moyen de la biomasse des souches et des racines est estimé à 0,40 t/ha et celui des aiguilles à 0,17 t/ha (0,52 t/ha pour une pessière saine).

En ce qui concerne le carbone (Tab. IV), la vitesse de stockage est évidemment beaucoup plus élevée pour la hêtraie de la Sapine que pour la pessière de la Latte.

5 - LE CARBONE DANS LES SOLS

De nombreuses études ont été menées sur les sols des bassins versants de la Sapine et de la Latte (D. Trévisan, 1982 ; P. Durand, 1989 ; C. Vannier, 1992 ; C. Martin et J.F. Didon-Lescot,

Tableau IV - Accroissement annuel moyen (t/ha), sur des périodes récentes, des stocks de carbone de la hêtraie de la Sapine et de la pessière de la Latte.

	Hêtraie de la Sapine	Pessière de la Latte
Aiguilles	-	0,09 [0,29 ★]
Branches, troncs et écorces	8,01	1,22 [1,32 ★ ▣]
Racines	1,22	0,20 [0,22 ★ ▣]
Total	9,23	1,51 [1,83 ★ ▣]

★ : pessière saine. ▣ : dans l'hypothèse d'une diminution de 1/3 de l'incrément annuel entre 1983 et 1989.

2001). Les sols sont des rankers, des sols brun acides ou des sols bruns ocres. Sous les hêtres comme sous les épicéas, l'humus est généralement de type moder.

5.1 - Les stocks de carbone des sols

Le tableau V synthétise les données nécessaires à l'évaluation des stocks de carbone des sols.

Tableau V - Le carbone dans les sols des bassins versants de la Sapine et de la Latte.

	Sapine (hêtraie) : 60 cm ▣					Latte (pessière saine) : 70 cm ▣				
	Ép.	da	Tf %	C %	C/N	Ép.	da	Tf %	C %	C/N
A ₀₀	2	0,02	-	44,5 •	38	2	0,15	-	42,5 •	25
A ₀	3	0,15	-	27,4 •	26	3	0,24	-	31,5 •	20
0 - 20 cm ▣	20	1,0	75,4	6,0 *	19,5	20	1,1	67,5	7,1 *	17,0
20 - 35 cm	15	1,0	75,4	4,3 *	19,0	15	1,1	67,5	5,1 *	14,9
Sol < 35 cm	15	1,1	75,4	3,2 ♦	-	20	1,3	67,5	3,2 ♦	-
Arène	10	1,2	75,4	0,9 ♦	-	15	1,5	67,5	1,2 ♦	-

▣ : épaisseur moyenne. Ép : épaisseur (en cm). da : densité apparente (en g/cm³). Tf : terre fine (éléments < 2 mm, en % du matériel tout-venant séché à l'air). C : teneur en carbone organique (méthode Anne – pour les litières, en % de la totalité du matériel séché à l'air ; pour les sols, en % de la terre fine séchée à l'air). C/N : rapport entre les teneurs moyennes en carbone organique Anne et en azote total Kjeldahl. ▣ : cette tranche de sol (entre 0 et 20 cm de profondeur) englobe l'horizon A₀. • : d'après les valeurs trouvées sur un profil du bassin de la Sapine et un profil du bassin de la Latte (C. Vannier, 1992). * : moyenne des teneurs mesurées dans des échantillons prélevés à la tarière en 1983 (10 profils pour le bassin de la Sapine et 8 profils pour celui de la Latte). ♦ : d'après les données de P. Durand (1989).

Lors de l'évaluation des stocks de carbone liés aux sols, l'horizon A₀ n'a pas été pris en compte séparément, car il est déjà englobé dans la tranche 0-20 cm des sols. Pour la hêtraie, nous avons en outre ajouté au carbone contenu dans l'horizon A₀₀ au moment du prélèvement (1,8 t/ha), la valeur correspondant aux retombées annuelles de feuilles (2,8 t/ha – d'après A. Hanchi, 1994).

Les stocks de carbone des sols sont estimés à 192 t/ha sous la hêtraie de la Sapine (avec les feuilles tombées dans l'année) et à 249 t/ha (dont 12,8 t/ha au niveau de l'horizon A₀₀) sous la pessière de la Latte. Les stocks des sols se révèlent nettement supérieurs à ceux des arbres, en particulier dans le cas de la pessière de la Latte : le rapport entre les stocks de carbone des arbres et des sols est de 0,81 (155/192) à la Sapine et de 0,24 à la Latte (61/249).

5.2 - L'évolution des stocks

Les sols renfermant des quantités importantes de carbone, on doit s'interroger sur leur participation au piégeage de cet élément depuis le début de la reforestation et sur le rôle qu'ils jouent actuellement.

5.2.1 Les effets de la reforestation sur les sols

Des datations ^{14}C ont été effectuées par le CRPG de Nancy sur la matière organique d'échantillons de sol prélevés sur un profil sous pessière dans le bassin de la Latte. Les âges croissent avec la profondeur : époque moderne à 0-5 cm ; 380 ans \pm 65 à 15-20 cm ; 1 695 ans \pm 65 à 35-40 cm ; 3 290 ans \pm 65 à 60-65 cm (C. Vannier, 1992). De ces résultats, il faut conclure que le renouvellement de la matière organique est très lent dans la partie inférieure des profils et que les teneurs en carbone organique relevées en profondeur (Tab. V) ne peuvent s'expliquer que par la faible efficacité des phénomènes de minéralisation.

Pour autant, toute modification des apports de matière organique se traduit forcément par une évolution des stocks de carbone organique. Mais à l'échelle de quelques décennies, cette évolution ne pourrait clairement se manifester que dans la partie superficielle des profils.

Les horizons minéraux des sols des bassins versants de la Sapine et de la Latte (Tab. V) peuvent être comparés avec ceux d'un autre bassin versant granitique, celui des Cloutasses, dont le couvert végétal est constitué d'une pelouse pâturée envahie de genêts qui font de temps à autre l'objet d'écobuages (Tab. VI).

Tableau VI - Teneurs en carbone organique et rapports C/N dans les sols des bassins versants de la Sapine, de la Latte et des Cloutasses (prélèvements en septembre 1983 – données inédites).

		Sapine (hêtraie)		Latte (pessière)		Cloutasses (pelouse)	
		C %	C/N	C %	C/N	C %	C/N
0-20 cm	moy. ext.	6,0 • (4,4-7,8)	19,5 (14,7-24,9)	7,1 * (3,6-9,7)	17,0 (14,3-20,1)	4,7 ♦ (2,3-6,6)	13,4 (10,0-15,5)
20-35 cm	moy. ext.	4,3 •• (1,8-5,7)	19,0 (14,7-26,3)	5,1 ** (2,2-8,2)	14,9 (7,5-17,9)	3,3 ♦ (2,1-5,1)	13,5 (9,5-16,1)

Les analyses ont été effectuées par le Laboratoire d'Analyse des Sols de l'INRA à Arras. moy. : valeurs moyennes (pour le rapport C/N, la valeur moyenne est donnée par le rapport entre les teneurs moyennes). ext. : valeurs extrêmes. Les teneurs sont exprimées en % du poids de la terre fine séchée à l'air. Le carbone organique est dosé par la méthode Anne et l'azote total par la méthode Kjeldahl. • : 9 échantillons. •• : 10 échantillons. * : 8 échantillons. ** : 7 échantillons. ♦ : 9 échantillons.

En appliquant aux sols sous pelouse du bassin des Cloutasses les densités apparentes indiquées par P. Durand (1,2 g/cm³ pour la couche 0-20 cm ; 1,4 g/cm³ pour la couche 20-35 cm) et une teneur en terre fine identique à celle des sols du bassin de la Latte, nous obtenons un stock de carbone de 123 t/ha entre 0 et 35 cm de profondeur, contre 139 t/ha à la Sapine et 162 t/ha à la Latte.

Les écarts entre les bassins versants sont accentués par le fait que la couche de sol prélevée entre 0 et 20 cm de profondeur englobe l'horizon A₀, lequel est plus épais sous forêt que sous pelouse. En s'appuyant sur un autre jeu de données, portant sur des profils dont l'horizon A₀ n'a pas été prélevé avec la couche 0-20 cm, P. Durand (1989) conclut que les teneurs en carbone organique se rangent comme suit par ordre décroissant : pessière > pelouse > hêtraie. Quoi qu'il en soit, la différence entre les stocks de carbone organique présents dans les horizons minéraux des sols sous pelouse et sous hêtraie est certainement très faible.

Les valeurs les plus faibles du rapport C/N sont trouvées dans le bassin des Cloutasses, où les sols ont un humus de type mull acide ou mull-moder. Les rapports C/N sont plus élevés dans les sols sous hêtraie que dans ceux sous pessière.

En définitive, la reforestation des bassins de la Sapine et de la Latte s'est traduite par une augmentation des rapports C/N. Cette évolution ne s'est pas accompagnée d'un accroissement important des stocks de carbone organique dans les horizons minéraux sous hêtraie. En revanche,

les couverts forestiers ont provoqué la formation d'une litière épaisse. Les stocks de carbone des horizons holorganiques sont estimés à 17 t/ha sous la hêtraie de la Sapine et à 35 t/ha sous la pessière de la Latte. Pour la litière de la hêtraie, la valeur présentée est inférieure à celle que l'on peut tirer des mesures de la biomasse de cette litière (hors feuilles de l'année) effectuées par A. Hanchi (1994) sur 16 placettes de 0,25 m² au cours des automnes 1991 et 1992 : 22,7 t/ha de carbone (pour 47,5 t/ha de matière organique séchée à 85°C).

5.2.2 L'évolution actuelle des stocks de carbone des litières et des sols

A. Hanchi (1994) et J.F. Didon-Lescot (1996) ont étudié *in situ*, par la méthode des sachets, la décomposition de feuilles de hêtre nouvellement tombées et celle d'aiguilles vertes. En un an, les feuilles ont perdu 21 % de leur masse et les aiguilles, 24 % (valeur obtenue en 1995, sur un site voisin du bassin de la Latte, dans des conditions climatiques exceptionnellement favorables à la décomposition). Au bout de deux ans, la perte de masse était de 34 % pour les feuilles de hêtre.

Les suivis réalisés permettent d'établir les équations exponentielles liant les évolutions des masses de feuilles et d'aiguilles mises dans les sachets, au temps écoulé depuis le début des expérimentations (J.R. Gosz *et al.*, 1973 ; S.C. Hart *et al.*, 1991 ; etc.). Ces équations indiquent que 99 % des feuilles ou aiguilles seraient décomposées après 24 ans pour la hêtraie et 17 ans pour la pessière. Ces durées étant nettement inférieures à l'âge des formations étudiées, l'incrément de la litière, au moment des recherches, était grossièrement proportionnel à celui de la masse foliaire. Dans la hêtraie, le rapport "masse des feuilles sénescentes / masse du bois" avoisine 0,0209 dans les arbres (5,9 / 281,9 – les valeurs étant exprimées en t/ha) et le rapport "masse totale / masse foliaire" 1,25 dans les retombées de litière (d'après les mesures de A. Hanchi, 1994). L'incrément du carbone dans les apports de litière pourrait donc atteindre 0,21 t/ha/an ($8,01 \times 0,0209 \times 1,25$ – voir tableau IV). Pour la pessière, dont les aiguilles restent plusieurs années sur les arbres, l'incrément est beaucoup plus faible, de l'ordre de 0,027 t/ha/an ($1,22 \times 0,0716 \times 0,2676^* \times 1,17^{**} - *$: "retombées annuelles d'aiguilles / masse foliaire", d'après B. Nihlgard, 1972 ; ** : rapport "masse totale / masse foliaire" dans les retombées de litière (d'après les mesures de J.F. Didon-Lescot, 1996). Rapportées aux durées de décomposition dans les litières, ces valeurs correspondent à un incrément annuel moyen des stocks de carbone des sols de 1,9 t/ha/an pour la hêtraie (avec des retombées de carbone de 2,8 t/ha/an en 1990) et de 0,18 t/ha/an pour la pessière. Pour une pessière saine, l'incrément de carbone pourrait atteindre 0,60 t/ha/an (avec des retombées de cet élément évaluées à 3,2 t/ha/an en 1989). Même en tenant compte de la surestimation de la vitesse moyenne de décomposition des aiguilles, l'incrément pour la pessière saine ne dépasserait pas 1,0 t/ha/an.

5.2.3 Les exportations de carbone

Pour affiner les connaissances sur l'évolution des stocks de carbone dans les sols, il faudrait disposer d'informations précises sur les exportations solides et dissoutes de cet élément, ainsi que sur les échanges à l'état gazeux entre les sols et l'atmosphère. Sur le Mont-Lozère, les seules indications disponibles sur les exportations de carbone concernent, d'une part, le bicarbonate, dont les teneurs sont très faibles et qui n'a pas grande signification en lui-même, et les transports solides.

Les exportations de matière organique solide ont été mesurées au cours de l'automne 1982 à l'exutoire du bassin versant de la Sapine (C. Schaller, 1982). Pour l'essentiel, les exportations se sont produites lors d'un épisode cévenol très violent, la crue des 7 au 9 novembre (1332 l/s en pointe), qui a été provoquée par des précipitations de 350 mm en deux jours. À débits identiques, les concentrations de flottants se sont effondrées entre le début et la fin de l'épisode (valeur maximale mesurée : 177 mg/l). Pour l'année hydrologique 1982-83, les exportations totales de matière organique sous forme de flottants peuvent être estimées entre 5 et 11 tonnes, ce qui correspond à des pertes spécifiques de carbone de 0,04 à 0,10 t/ha. Les traces d'érosion de la litière fraîche et des horizons holorganiques sont localisées à proximité du thalweg principal et des drains affluents.

6 - PERSPECTIVES : LA POURSUITE DE LA REFORESTATION

L'accroissement des stocks de carbone n'est pas limité à l'augmentation de la biomasse et à l'évolution des sols dans les secteurs couverts de forêt. Il résulte également de l'extension de la forêt. S. Lhuillier (2000) a dressé le bilan des modifications de l'occupation de l'espace par différents types de formations végétales entre 1970 et 1999.

Tableau VII - Surfaces occupées en 1970 et en 1999 par chaque formation végétale sur le secteur Mont-Lozère - Bougès Nord.

	1970		1999	
	Hectares	%	Hectares	%
1) Végétation très claire ou nulle	261	0,8	192	0,6
2) Herbacées (pelouses, prairies, cultures)	7976	24,2	4898	14,9
3) Herbacées-ligneux bas (landes)	10326	31,4	8476	25,7
4) Ligneux bas-ligneux hauts (landes boisées)	1770	5,4	1787	5,4
5) Herbacées-lign. hauts (forêts claires entretenues)	494	1,5	237	0,7
6) Herbacées-lign. bas-lign. hauts (forêts claires)	660	2,0	377	1,1
7) Ligneux hauts (forêts assez claires)	2386	7,2	1177	3,6
8) Ligneux hauts denses (forêts denses)	9049	27,5	15779	47,9
Total	32922	100	32922	100

Le recouvrement par les ligneux hauts est compris entre 0 et 25 % pour les lignes 1, 2, 3 ; entre 25 et 50 % pour les lignes 4, 5, 6 ; entre 50 et 75 % pour la ligne 7 ; entre 75 à 100 % pour la ligne 8. Ligneux bas : genêt purgatif, genêt à balais, callune, myrtille... Ligneux hauts : hêtre, épicéa, pin à crochet...

Entre 1970 et 1999, les milieux ouverts (lignes 1 et 2 dans le tableau VII) sont passés de 8237 ha à 5090 ha, les milieux de transition (ligne 3) de 10326 ha à 8476 ha, et les milieux fermés de 14359 à 19356 ha. En 2030, si le rythme d'évolution des différentes formations se maintenait à son niveau actuel, les milieux ouverts ne représenteraient plus que 9,2 % de la surface totale (contre 15,5 % actuellement), les milieux de transition 19,3 % (contre 25,7 % actuellement) et les milieux fermés 71,5 % (contre 58,8 % actuellement). La part des forêts denses s'élèverait à 63,5 % (contre 47,9 % actuellement).

7 - CONCLUSION

L'extension des forêts qui s'est produite au XX^{ème} siècle sur le Mont-Lozère, soit par reforestation (résineux), soit par revégétalisation (hêtres), a entraîné un stockage important de carbone. Différentes recherches menées sur les couverts végétaux permettent, parfois au prix de quelques approximations, de préciser les évolutions.

Dans les années 1985-1990, les quantités de carbone stockées dans la biomasse atteignaient déjà 61 t/ha pour une pessière (Latte) et 155 t/ha pour une hêtraie non entretenue (Sapine). Or la part des milieux fermés (taux de recouvrement > 25 %) est passée de 20,4 % en 1850 à 58,9 % en 1999. Sur les 32900 ha du Mont-Lozère et du Bougès nord, les forêts denses (taux de recouvrement > 75 %), qui étaient réduites à l'état de lambeaux en 1850, couvrent maintenant près de 15800 ha.

Le carbone organique est sensiblement plus abondant dans les sols que dans les végétaux. Toutefois l'augmentation des teneurs en cet élément à la suite du développement des forêts est restée négligeable ou faible dans les horizons minéraux. Seuls les horizons holorganiques ont participé activement à l'accroissement des stocks. Ils renferment au moins 17 tonnes de carbone par hectare sous la hêtraie de la Sapine et 35 tonnes par hectare sous la pessière de la Latte.

Les possibilités de stockage ne sont pas épuisées. Sur les périodes ayant immédiatement précédé les observations, les incréments annuels des stocks de carbone retenus par les arbres ont atteint 1,8 t/ha (sur 15 ans) à la Latte, pour une pessière saine, et 9,2 t/ha (sur 9 ans) pour la hêtraie de la Sapine. À ces stockages s'ajoutent ceux qui se produisent au niveau des sols : 0,60 t/ha/an à la Latte et 1,9 t/ha/an à la Sapine. Enfin, la fermeture des milieux encore ouverts et la densification des milieux déjà fermés se poursuivent. Au rythme actuel d'évolution, la superficie couverte par les forêts denses pourrait avoisiner 21 000 ha en 2030.

Pour importantes qu'elles soient, les évolutions mises en évidence – qui tendent en fait à rapprocher le fonctionnement du couvert végétal de la situation qui prévalait avant les excès de l'anthropisation – sont-elles de nature à contribuer sur le long terme à la gestion globale de la séquestration du carbone libéré par l'utilisation des énergies fossiles ? Les forêts n'ont malheureusement pas une croissance illimitée et elles subissent souvent des coupes avant d'avoir atteint leur développement maximal. Pour permettre la séquestration de carbone la plus élevée possible, il faudra donc repenser la gestion des forêts et celle des bois qui en sont tirés. Mais l'incrément des stocks de carbone par les forêts (à supposer que celles-ci soient au moins préservées partout dans le monde) n'apportant pas de solution définitive, ni même déterminante à court terme, il faudra bien aussi se résoudre à traiter les causes même du problème. Dans cette perspective, on peut souhaiter que les forêts ne servent pas d'argument dans des marchandages géo-politico-économiques : la forêt alibi, ou un placebo de plus sur les misères du monde.

Remerciements : Nous sommes reconnaissants à F. Lelong et B. Guillet, anciens responsables scientifiques du BVRE du Mont-Lozère, de nous avoir fait bénéficier de leur expérience. Nous remercions aussi à tous ceux qui ont travaillé sur le BVRE et dont les résultats ont été utilisés pour cet article.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- Baskerville G.I., 1965. Estimation of dry weight of tree components and total standing in conifer stand. *Ecology*, 46 : 867-869.
- Beaulieu J.L. De, Gilot E., 1972. Végétations holocènes du Mont Lozère : analyses polliniques et datages. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 274 : 1641-1644.
- Beaulieu J.L. De, Pons A., 1979. Les peuplements peu productifs du Parc national des Cévennes. Chapitre V. Recherches pollenanalytiques sur l'histoire de l'action humaine dans la région du Parc national des Cévennes. *Annales du PnC*, 1 : 101-126.
- Dauge J.M. (1986) - Évolution de l'impact du pâturage sur la fertilité du milieu (versant sud du Mont-Lozère). *Parc national des Cévennes*, 68 p. + annexes (54 p.).
- Didon-Lescot J.F., 1996. *Forêt et développement durable au Mont-Lozère. Impact d'une plantation de résineux, de sa coupe et de son remplacement sur l'eau et sur les réserves minérales du sol.* Thèse de l'Université d'Orléans, 161 p.
- Durand P., 1989. *Biogéochimie comparée de trois écosystèmes (pelouse, hêtraie, pessière) de moyenne montagne granitique (Mont-Lozère, France).* Thèse de l'Université d'Orléans, 186 p.
- Duvigneaud P., Kestemont P., Ambroes P., 1971. Productivité primaire des forêts tempérées d'essences feuillues caducifoliées en Europe occidentale. In: *Productivité des Écosystèmes forestiers* (Colloque, Bruxelles), Édit. UNESCO: 259-270.
- Godron M. (et collaborateurs), 1974. *Cartes des formations végétales et des espèces dominantes ligneuses du Parc national des Cévennes au 1 / 50000.* CEFÉ, PnC, DGRST.

- Gosz J.R., Likens G.E., Bormann F.H., 1973. Nutrient release from decomposing leaf and branch litter in the Hubbard Brook Forest, New Hampshire. *Ecol. Monog.*, 43 : 173-191.
- Hallbäck L., 1992. Long term changes of base cation pools and biomass in a beech and spruce forest of Southern Sweden. *Z. Pflanz. Bodenk.*, 155 : 51-60.
- Hanchi A., 1994. *Cycle de l'eau et des éléments biogènes dans un bassin versant forestier: cas d'une hêtraie au Mont-Lozère*. Thèse de l'Université de Bourgogne, 232 p.
- Hart S.C., Firestone M.K., Paul E.A., 1992. Decomposition and nutrient dynamics of ponderosa pine needles in a Mediterranean-type climate. *Can. Jour. Fro. Res.*, 22 : 306-314.
- Le Goaster S., Dambrine É., Ranger J., 1991. Biomasses et minéralomasses de 3 peuplements d'épicéa commun âgés de 10, 30 et 85 ans. *Acta Oecol.*, 12 (6) : 771-789.
- Lhuillier S., 2000. *Évolution des formations végétales sur le mont Lozère et le Bougès nord entre 1970 et 1999 à partir des photographies aériennes*. Rapport de stage au Parc national des Cévennes, 65 p. + cartes.
- Maman O., 1997. *Analyse des produits d'hydrolyse de la lignine par Électrophorèse Capillaire : application à la reconnaissance de signatures d'écosystèmes dans les sols, les paléosols et les sédiments*. Thèse de l'Université d'Orléans, 119 p. + annexes.
- Martin C., Didon-Lescot J.F., 2001. Observations sur les caractères agronomiques des sols. In : *Étude intégrée du bassin versant du Haut-Tarn appliquée à la gestion des ressources en eau et des fonctionnements hydrobiologiques*, rapport de l'UMR 6012 "ESPACE" au Parc national des Cévennes, chapitre III: 31-39.
- Nihlgård B., 1972. Plant biomass, primary production and distribution of chemical elements in a beech and planted spruce in south Sweden. *Oikos*, 23 (1): 69-81.
- Nys C., Ranger D., Ranger J., 1983. Minéralomasse et cycle biologique d'une pessière de 50 ans. *Ann. Sci. For.*, 40 (1: "Étude comparative de deux écosystèmes forestiers feuillus et résineux des Ardennes primaires françaises"): 41-66.
- Pillet P., 1981. *Recherche sur l'organisation et l'évolution des unités écologiques du Parc national des Cévennes en vue d'établir le plan de gestion de ce territoire*. Rapport final, vol. I et II, Muséum National d'Histoire Naturelle et PnC, 77 et 132 p.
- Ranger J., Cuirin G., Bouchon J., Colin M., Gehaye D., Mohamed Ahamed D., 1992. Biomasse et minéralomasse d'une plantation d'épicéa commun (*Picea abies* Karst) de forte production dans les Vosges. *Ann. Sci. For.*, 49 : 651-668.
- Schaller C., 1982. *Part des transports organiques dans l'érosion de trois petits bassins versants à couverture végétale contrastée (Mont-Lozère, France)*. Mémoire de travail pratique du diplôme d'ingénieur du Génie Rural, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 60 p. + annexes.
- Trévisan D., 1982. *Pédogenèse et typologie des sols de trois bassins versants du Mont-Lozère*. Mémoire de DEA, Université de Nancy, 84 p.
- Ulrich B., Mayer R., Heller H., 1974. *Data Analysis and data Synthetisis of Gorest Ecosystems*. Göttinger Bodenkundichle Berichte, 30, 459 p.
- Vannier C., 1992. *Les modalités de la rétention du soufre dans les sols de deux bassins versants forestiers du Mont-Lozère. Effet de la végétation et de quelques propriétés physico-chimiques des sols*. Thèse de l'Université d'Orléans, 113 p. + annexes.